

조속기의 동적 평형위치 해석

강주석^{1*}

¹한국교통대학교 철도차량시스템공학과

Analysis of Dynamic Equilibrium Configuration of Speed Governor

Juseok Kang^{1*}

¹Dept. of Railway Vehicle System Eng., Korea National University of Transportation

요 약 본 연구에서는 구속조건을 가진 기계계의 동적 평형위치를 다물체 동역학 해석방법을 이용하여 계산하였다. 다물체계에서 얻어지는 시간 구속조건을 가진 구속조건식과 동역학식으로부터 독립좌표계로 이루어진 동적평형식을 유도하였다. 동적 평형식은 구속조건식과 함께 비선형 대수방정식의 형태로서 Newton-Raphson 방법을 이용하여 수치해를 구하였다. 제안된 동적 평형 계산 방법을 조속기에 적용하여 동적 평형위치를 구하였다. 해석결과는 상용 프로그램의 동역학해석을 통한 평형위치의 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 조속기의 회전 각속도에 대한 평형위치를 계산하고 설계 파라미터에 대한 평형위치의 영향을 분석하였다.

Abstract This paper proposes a method to obtain the dynamic equilibrium configuration of a constrained mechanical system by using multibody dynamic analysis. Dynamic equilibrium equations with independent coordinates are derived from the time-dependent constraint equations and dynamic equations of a multibody system. The Newton-Raphson method is used to find numerical solutions for nonlinear algebraic equations that are composed of the dynamic equilibrium and constraint equations. The proposed method is applied to obtain the dynamic equilibrium configuration of a speed governor, and the results are verified on the basis of the results from conventional dynamic analysis. Furthermore, vertical displacements at equilibrium configuration, which varied with the rotational velocity of the speed governor, are calculated, and design parameter analysis of the equilibrium configuration is presented.

Key Words : dynamic equilibrium configuration, constrained mechanical system, multibody dynamic analysis, speed governor

1. 서론

기계계의 정적평형 해석은 동적거동을 예측하기 전에 필수적으로 거쳐야 하는 단계이다. 정적평형위치에서 동적인 거동이 시작되기 때문이다. 이와 같은 기계계의 정적평형에 대한 연구는 이미 다수가 제시되었다[1]. 정적 평형위치 계산은 상용 프로그램에도 적용 중에 있다. 그러나 동적 평형위치 계산에 관한 연구는 드물며 대부분의

상용 동역학 해석 프로그램에서 동적 평형 위치 계산은 제공되고 있지 않다. 최근에는 조인트 좌표를 이용한 좌표계에서 동적 평형위치를 계산하는 방법이 제안되었다 [2].

동적 평형위치는 기계계에서 외력과 관성의 유효력이 균형을 이루는 것이다[3,4]. 이에 대한 대표적인 예가 조속기이다. 조속기는 회전 관성에 의한 원심력이 중력이나 스프링 힘과 균형을 이루는 기구이다. 조속기는 오래전부

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2010-0022205)

*Corresponding Author : Juseok Kang(Korea National Univ. of Transportation)

Tel: +82-70-8855-1651 email: kjuseok@ut.ac.kr

Received September 23, 2013 Revised October 9, 2013 Accepted October 10, 2013

터 사용된 속도 제어장치로서 CVT나 특수용차, 디젤 엔진, 가스 터빈, 수력 터빈, 엘리베이터 및 유량 제어기 등 산업용 기계에 이용되어 왔다[5].

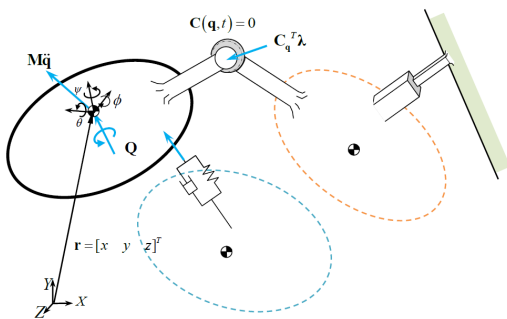
조속기가 사용되는 제품에 대한 정확한 속도 제어를 위해 조속기의 동적 거동과 안정성의 예측은 중요한 과제로서 이에 대한 연구가 다수 진행 되어왔다.

조속기의 정적 상태 및 과도상태 응답에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 해석결과가 제시되었으며, 고유치해석과 분기해석을 이용한 조속기의 안정성에 대한 연구도 제시되었다[6,7]. 또한, 조속기의 운동방정식의 선형화에 의한 안정성 해석방법이 제안되었다[8].

설계적인 관점에서는 조속기의 동적평형 위치를 신속히 계산하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 조속기를 구속조건을 가진 다물체계로 모델링하여 동적 평형 위치를 구한다. 동적 평형위치에서는 독립좌표계의 속도와 가속도가 0이 된다. 이와 함께 동적 평형 위치에서는 구속조건식도 만족하여야 한다. 본 연구에서는 동적 평형위치를 계산하기 위한 이론식을 유도한다. 이론식은 비선형 대수방정식의 형태로 이에 대한 수치해석적 계산 방법을 제시하였다. 해석결과는 상용 프로그램의 동역학해석을 통한 평형위치의 결과와 비교하여 타당성을 검증한다. 회전 각속도에 대한 평형위치를 계산하고 조속기의 설계 파라미터에 대한 평형위치의 영향을 분석하였다.

2. 구속된 기계계의 동적 평형 해석

2.1 동적 평형식 유도



[Fig. 1] A dynamics model with constraint conditions

Fig. 1과 같이 구속조건을 가진 기계계에 외력이 작용하는 경우 동역학적 거동을 분석하기 위해서는 다물체 동역학 해석방법을 이용하면 체계적이고 정확한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 동적 평형식을 구하기 위해서 우선 다물체계의 구속조건식과 동역학식을 고려한다.

이들 구속조건식과 동역학식으로부터 동적 평형식을 유도한다.

구속된 다물체계는 임의의 위치에서 다음과 같은 구속조건식을 만족한다.

$$C(\mathbf{q}, t) = 0 \quad (1)$$

여기서, t 는 시간이며 $\mathbf{q} = [x \ y \ z \ \psi \ \phi \ \theta]^T$ 는 다물체계의 일반좌표이다.

위의 구속조건식을 포함하여 구속된 다물체계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q}_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, \mathbf{M} 은 질량 및 관성모멘트로 이루어진 관성텐서, λ 는 라그랑지 승수, \mathbf{Q} 는 다물체계에 작용하는 외력을 나타내는 항, \mathbf{Q}_d 는 구속 조건식을 시간에 대해 두 번 미분할 때 나타나는 2차항이다.

식 (1)의 구속 조건식을 시간에 대해 미분하여 얻은 속도 구속 조건식은 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_t = 0 \quad (3)$$

\mathbf{C}_t 는 변위가 시간 t 의 함수로 결정되는 항으로서 조속기 모델인 Fig. 2의 경우 $\theta - \omega t = 0$ 와 같은 형식으로 표현 된다.

위의 구속조건 자코비언은 독립좌표계 \mathbf{q}_i 와 종속좌표계 \mathbf{q}_d 로 나누어 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{q_d} & \mathbf{C}_{q_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_d \\ \dot{\mathbf{q}}_i \end{bmatrix} = -\mathbf{C}_t \quad (4)$$

여기서, 일반좌표계 \mathbf{q} 의 개수가 N 개이고 구속조건식 $C(\mathbf{q}, t) = 0$ 이 M 개인 경우, 독립좌표계 \mathbf{q}_i 의 개수는 $N-M$ 개이고 종속좌표계 \mathbf{q}_d 는 M 개이다.

위 식으로부터 종속좌표계의 속도는 독립좌표계의 속도로서 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{C}_{q_d}^{-1} (-\mathbf{C}_{q_i} \dot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{C}_t) \quad (5)$$

위의 식으로부터 일반좌표의 속도는 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{C}_{q_d}^{-1} \mathbf{C}_t \quad (6)$$

여기서 속도변환행렬 \mathbf{B} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C}_{q_d}^{-1} \mathbf{C}_{q_i} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (7)$$

동적 평형인 경우 위의 식에서 독립좌표계의 속도

$\dot{\mathbf{q}}_i = \mathbf{0}$ 이므로 일반좌표의 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{C}_{q_i}^{-1} \mathbf{C}_i \quad (8)$$

일반좌표계로 나타낸 시스템의 지배방정식 (2)는 독립좌표계만으로 표현할 수 있게 된다. 이는 다음과 같은 좌표변환행렬의 특성에 따르는 것이다.

$$\mathbf{B}^T \mathbf{C}_q^T = 0 \quad (9)$$

여기서 \mathbf{C}_q 는 구속조건 자코비언이다.

앞에서 보인 바와 같이 속도 구속조건식을 미분하여 얻은 가속도 구속 조건식은 다음과 같은 형태를 띈다.

$$\mathbf{C}_q \ddot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\gamma} \quad (10)$$

여기서 속도 승수 항 $\boldsymbol{\gamma}$ 는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\gamma} = -(\mathbf{C}_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2\mathbf{C}_{q_i} \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{C}_i \quad (11)$$

마찬가지로, 일반좌표계의 가속도 항은 다음과 같이 독립좌표계를 이용하여 표현이 가능하다.

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{B} \ddot{\mathbf{q}}_i + \boldsymbol{\gamma}' \quad (12)$$

여기서 $\boldsymbol{\gamma}' = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{q_i}^{-1} \boldsymbol{\gamma} \\ 0 \end{bmatrix}$ 이다.

식 (2)에 식 (12)를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{C}_q^T \\ \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} \ddot{\mathbf{q}}_i \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} - \mathbf{M} \boldsymbol{\gamma}' \\ \mathbf{Q}_d \end{bmatrix} \quad (13)$$

위의 식의 첫 번째 식의 양변에 \mathbf{B}^T 를 전승하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = (\mathbf{B}^T \mathbf{M} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T (\mathbf{Q} - \mathbf{M} \boldsymbol{\gamma}') \quad (14)$$

위의 식은 독립좌표계의 수와 동일한 N-M개의 식으로 이루어진다. 동적 평형의 위치에서 독립좌표계 $\ddot{\mathbf{q}}_i$ 는 0이 되어야 한다. 결국 식 (14)가 0을 만족하는 위치에서 동적 평형의 위치를 구할 수 있다.

2.2 수치해석 알고리즘

동적 평형의 위치에서는 구속조건식 (1)과 위의 동적 평형식 (14)의 두식을 동시에 만족하여야 한다. 이를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}(\mathbf{q}) \\ \ddot{\mathbf{q}}_i(\mathbf{q}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (15)$$

위의 식은 M개의 구속조건식과 N-M개의 동적 평형식으로 이루어져 전체적으로 N개의 식이 된다.

식 (15)는 비선형 대수방정식이므로 Newton-Raphson 방법과 같은 수치해석적인 방법으로 해를 구할 수 있다. Newton-Raphson 방법의 반복수행법에서 수치해는 $\mathbf{q} = \mathbf{q} + \Delta \mathbf{q}$ 로 갱신되는 데 이때, 해의 증분값 $\Delta \mathbf{q}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_q(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial \ddot{\mathbf{q}}_i}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \Delta \mathbf{q} = - \begin{bmatrix} \mathbf{C}(\mathbf{q}) \\ \ddot{\mathbf{q}}_i(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, 자코비언 $\mathbf{C}_q(\mathbf{q})$ 는 구속조건식을 미분하여 $\frac{\partial \ddot{\mathbf{q}}_i}{\partial \mathbf{q}}$ 수학적 방법으로 정확히 구할 수 있다. 그러나 $\frac{\partial \ddot{\mathbf{q}}_i}{\partial \mathbf{q}}$ 는 수학적 방법으로 구할 수 없으므로 수치해석적인 방법으로 구하여야 한다. 여기서는 다음과 같이 유한차분법을 이용하여 구하였다.

$$\frac{\partial \ddot{\mathbf{q}}_i}{\partial q^k} = \frac{\ddot{\mathbf{q}}_i(\mathbf{q} + \Delta q^k) - \ddot{\mathbf{q}}_i(\mathbf{q})}{\Delta q^k} \quad \text{for } k = 1, \dots, N \quad (17)$$

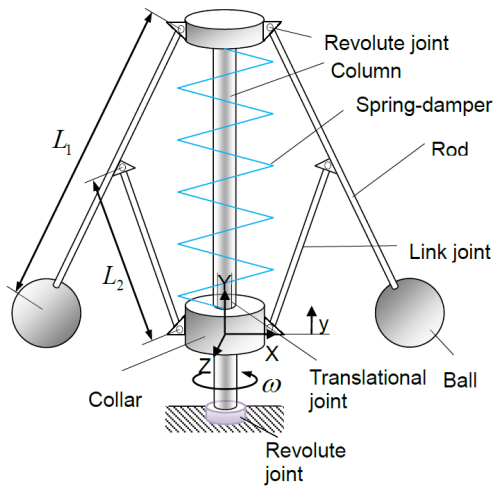
여기서 일반좌표 $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q^1 \\ \vdots \\ q^k \\ \vdots \\ q^N \end{bmatrix}$ 에서 증분값은

$$\mathbf{q} + \Delta q^k = \begin{bmatrix} q^1 \\ \vdots \\ q^k + \Delta q^k \\ \vdots \\ q^N \end{bmatrix} \text{로 계산된다.}$$

본 연구에서는 위의 과정에 대해 Matlab[10]을 이용하여 계산 프로그램을 만들고 수치해석 해를 구하였다.

3. 해석결과

앞에서 보인 구속조건을 가진 다물체계의 동적 평형 위치 계산 방법을 Fig. 2에 보인 조속기에 적용하여 동적 평형위치를 계산하였다. 조속기는 볼(Ball)이 달린 봉(Rod)이 링크 조인트(Link joint)와 회전 조인트(Revolute joint)를 통해 기둥(Column)과 칼라(Collar)에 연결된다. 칼라는 병진 조인트(Translational joint)를 통해 칼럼과 결합된다. 칼럼은 일정 각속도 ω 로 회전하게 되며 이때 칼라는 수직방향 y로 이동하게 된다.



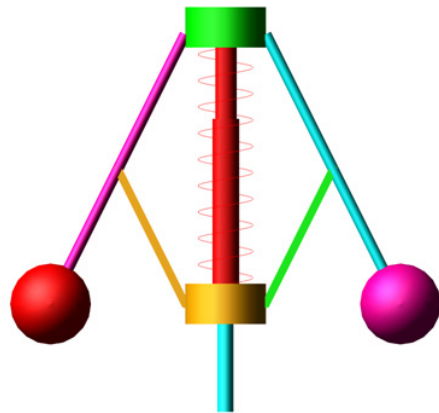
[Fig. 2] A speed governor system

[Table 1] Data of speed governor

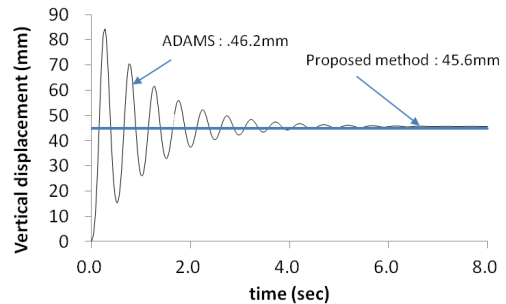
Part	Data
Ball m, I	0.132kg, (9.9, 9.9, 9.9)e-5N-m
Column m, I	0.2kg, (5, 1.4, 5)e-4N-m
Collar m, I	0.083kg, (6.2, 9.3, 6.2)e-6N-m
Rod m, I	0.011kg, (1.1, 0.02, 1.1)e-6N-m
Spring k, c	20N/m, 0.7N/m/sec
Rod $L1$	108mm
Link $L2$	56mm

Fig. 2에서 강체는 볼, 칼럼, 칼라, 로드의 4개로서 일반좌표계는 $4 \times 6 = 24$ 개가 된다. 구속조건은 3개의 회전 조인트가 $3 \times 5 = 15$ 개, 1개의 병진 조인트로 $1 \times 5 = 5$ 개, 2개의 링크 조인트 $2 \times 1 = 2$ 개, 각속도 시간조건 $\theta - \omega t = 0$ 의 1개로서 총 23개가 된다. 그러므로 일반좌표계 $N=24$, 구속조건 $M=23$ 으로서 식 (15)는 24개의 식으로 구성되며 미지수는 24개를 구하는 방식이 된다.

조속기의 물성치는 Table 1과 같다. 본 연구의 동적평형 위치계산 방법의 타당성은 다물체 동역학 해석프로그램의 결과와 비교하여 검증하였다. Fig. 3은 Table 1의 데이터를 이용하여 ADAMS로 구성한 조속기의 모델을 보여준다.



[Fig. 3] Multibody dynamics model of speed governor



[Fig. 4] Vertical displacement as a function of time

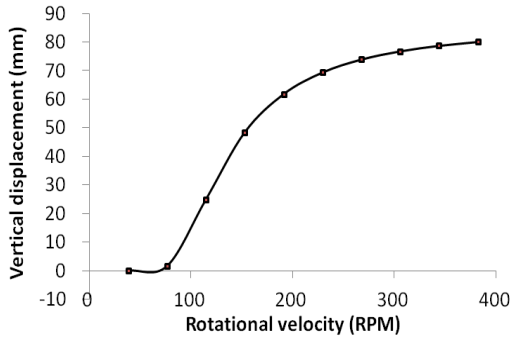
[Table 2] Table title

Rot. Velocity(RPM)	Proposed Method(mm)	ADAMS (mm)
150	45.6	46.2
200	63.3	64.0
250	71.4	72.1

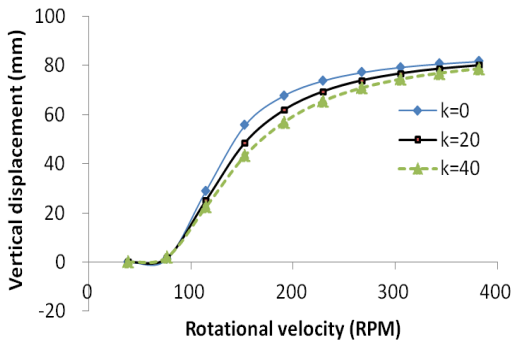
Fig. 4는 일정한 각속도 $\omega = 150RPM$ 으로 회전하였을 때 칼라의 수직변위 y 의 값을 ADAMS로 계산한 결과이다. ADAMS는 동적 평형계산 방법이 제공되지 않아 동역학 해석을 수행하였다. 시간이 지남에 따라 수직 변위가 진동을 하다가 평형위치로 수렴하는 값을 동적 평형위치 값으로 하였다. ADAMS로 계산된 평형위치에서 수직 변위는 $y=46.2mm$ 이다. 본 해석결과로 구한 평형위치 값은 $y=45.6mm$ 로서 ADAMS와 일치하는 해석 결과를 보였다.

동일한 해석결과이지만 ADAMS는 동적 평형위치를 구하기 위해서 동역학 운동방정식으로부터 해를 구하므로 시간이 오래 걸리지만 본 연구에서는 비선형 대수방

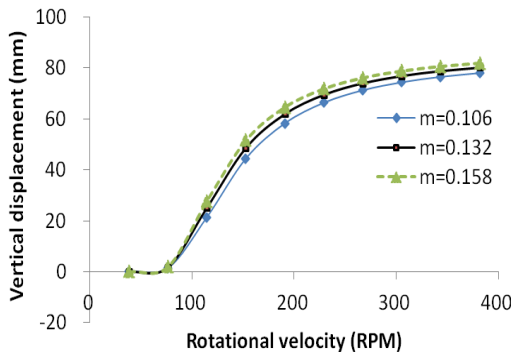
정식으로 해를 구하므로 짧은 시간에 간단히 해를 구할 수 있다. 같은 방법으로 200RPM과 250RPM에서 해석결과와의 비교를 Table 2에 보였다. 본 연구에서 제시한 동적 평형의 대수방정식으로 구한 평형위치 계산 방법의 타당성을 검증하였다.



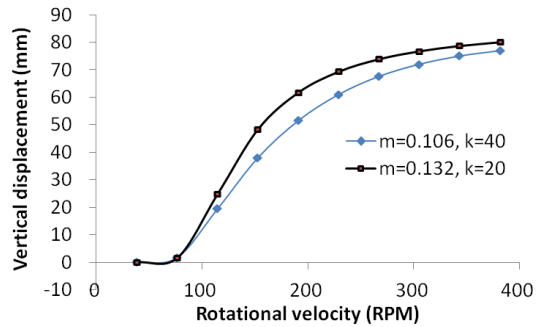
[Fig. 5] Vertical displacement as a function of rotational velocity



[Fig. 6] Variation of vertical displacement due to spring stiffness



[Fig. 7] Variation of vertical displacement due to governor mass



[Fig. 8] Vertical displacement due to spring stiffness and governor mass change

Fig. 5는 각속도 ω 의 변화에 따라 수직 평형위치 y 를 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 결과이다. 낮은 속도에서는 수직 평형위치가 0에 가깝지만 각속도가 커짐에 따라 수직 평형위치가 커지는 것을 볼 수 있다. 80RPM에서 150RPM까지는 선형적으로 증가하다가 그 이상에서는 수직 평형위치 크기가 둔화된다.

Fig. 6은 스프링 상수를 변화시킨 경우의 각속도와 평형위치와의 관계를 보여준다. 스프링의 강성이 큰 $k=40N/m$ 인 경우 각속도에 대한 수직 평형위치는 작아지지만 좀 더 선형적인 결과를 보여준다. 반대로 스프링 상수를 0으로 하는 경우 각속도에 대한 수직 평형 위치는 더욱 커짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 볼의 질량을 변화시킨 경우의 각속도와 평형위치와의 관계를 보여준다. 볼의 질량을 10% 줄인 $m=0.106kg$ 인 경우 각속도에 대한 수직 평형위치가 작아진다. 반대로 볼의 질량을 10% 늘인 $m=0.158kg$ 인 경우 각속도에 대한 수직 평형위치는 커진다.

Fig. 6과 Fig. 7로부터 스프링은 강하고 볼의 질량은 줄이는 것이 각속도와 수직변위가 선형적으로 되는 데 효과적임을 알았다. Fig. 8은 스프링 상수 $k=40N/m$, 볼의 질량 $m=0.106kg$ 인 경우와 현 사양과의 비교 결과를 보여준다. 현 사양보다 좀 더 선형적인 관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 조속기의 각속도와 수직변위의 관계를 쉽게 예측할 수 있다. 또한, 설계 파라미터를 변경하면서 각속도와 수직변위의 관계 변화를 예측하여 조속기의 설계파라미터를 변경함으로써 조속기 설계에 응용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 제시한 동적 평형위치 계산 방법은 조속기 이외의 일반적인 기계에도 적용할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 구속조건을 가진 기계계의 동적 평형 위치를 다물체 동역학 해석방법을 이용하여 계산하였다. 일반적인 다물체계에서 얻어지는 시간 구속조건을 가진 구속조건식과 동역학식으로부터 독립좌표계로 이루어진 동적 평형식을 유도하였다. 이와 같은 동적 평형식은 구속조건식과 함께 비선형 대수방정식의 형태를 나타내며 본 연구에서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 수치해를 구하였다.

본 연구에서 제시한 동적 평형 계산 방법을 조속기에 적용하여 동적 평형 위치를 구하였다. 해석결과와 상용 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS와 비교하여 본 연구 방법의 타당성을 검증하였다. 조속기 설계 사양에 대하여 회전 각속도에 대한 수직 평형 위치를 예측하였다. 스프링 상수를 키우고 볼의 질량을 줄일 때 수직 평형 위치는 작아지며 각속도와 수직 평형 위치의 관계가 좀 더 선형적으로 되는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시한 동적 평형 위치 계산 방법은 일반적인 방법으로서 조속기 이외의 일반적인 기계계에 적용할 수 있다.

References

[1] J. L. Gaikwad, B. Dasgupta, U. Joshi, "Static equilibrium analysis of compliant mechanical systems using relative coordinates and loop closure equations", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 39, pp. 501-517, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2003.11.004>

[2] B. S Kim, S. M Eom, H. H. Yoo, "Design variable tolerance effects on the natural frequency variance of constrained multi-body systems in dynamic equilibrium", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 320, pp. 545-558, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2008.08.015>

[3] H. S. Byun, "Analysis of Dynamics Characteristics of an Underwater Platform System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 8 pp. 3345-3351, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.8.3345>

[4] J. S. Kang, "A three dimensional wheelset dynamic analysis considering wheel-rail two point contact", *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.15, No. 1, pp.1-8, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.1.001>

[5] K. H. Fasol, "A short history of hydropower control", *IEEE Control Syst. Mag.* Vol. 22, pp. 68-76, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCS.2002.1021646>

[6] C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, "A computer program for simulating the steady-state and transient behaviour of direct-acting engine governors", *Advances in Engineering Software*, Vol. 30, pp. 281-289, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00078-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00078-7)

[7] J. Sotomayora, L. F. Mellob, D. C. Braga, "Stability and Hopf bifurcation in an hexagonal governor system", *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, Vol. 9, pp. 889-898, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nonrwa.2007.01.007>

[8] M. Denny "Watt steam governor stability" *European Journal of Physics*, Vol. 23, pp. 339-351, 2002
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/23/3/313>

[9] P.E. Nikravesh, Computer-aided analysis of mechanical systems, Prentice-hall, 1988.

[10] Using Matlab Ver.6, The Mathworks Inc., Natick, MA, USA, 2004.

강 주 석(Juseok Kang)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학석사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2006년 7월 : 한국지엠 부장
- 2006년 7월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 교수

<관심분야>

철도차량, 동역학, 진동소음